

ЗАХИСНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНОГО ПОКРИТТЯ З ЦЕОЛІТ-ФОСФАТНИМ ПРОТИКОРОЗІЙНИМ ПІГМЕНТОМ НА АЛЮМІНІЄВОМУ СПЛАВІ

Б. М. ДАЦКО¹, О. П. ХЛОПИК¹, І. М. ЗІНЬ^{1,2}, Н. Й. СОБОДОШ¹,
М. Я. ГОЛОВЧУК¹, С. А. КОРНІЙ¹

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Національний університет "Львівська політехніка"

Досліджено вплив комплексного цеоліт-фосфатного протикорозійного пігменту, отриманого механохімічним модифікуванням синтетичного цеоліту катіонами кальцію з подальшим рідкофазним осадженням цинк-фосфатної фази, на захисні властивості епоксидного покриття на алюмінієвому сплаві. Методами електрохімічної імпедансної спектроскопії, оптичної 3D профілометрії та випробуваннями у камері вологості і тепла встановлено, що додавання такого пігменту до епоксидного покриття забезпечує суттєве підвищення корозійної тривкості алюмінієвого сплаву. При цьому збільшується опір переносу заряду металу та зменшується кількість продуктів корозії в місцях дефектів лакофарбового шару.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, епоксидне покриття, протикорозійний комплексний цеоліт-фосфатний пігмент, двостадійна модифікація, електрохімічна імпедансна спектроскопія, 3D профілометрія.

The effect of complex zeolite-phosphate anti-corrosion pigment obtained by mechanochemical modification of synthetic zeolite with calcium cations followed by liquid-phase deposition of zinc-phosphate phase on the protective properties of epoxy coating on aluminum alloy was investigated. Using the methods of electrochemical impedance spectroscopy, optical 3D profilometry, and tests in a humidity and heat chamber, it was established that the addition of such pigment to an epoxy coating provides a significant increase in its anti-corrosion properties. As a result, the metal charge transfer resistance increases and the amount of corrosion products in the sites of defects in the paint layer decreases.

Keywords: aluminium alloy, epoxy coating, anti-corrosion complex zeolite-phosphate pigment, two-stage modification, electrochemical impedance spectroscopy, 3D profilometry.

Вступ. Алюмінієві сплави широко використовують в авіаційній та нафтогазовидобувній галузях промисловості, у будівництві та транспорті завдяки їх високій міцності та малій густині [1]. Зазвичай вони стійкі до загальної корозії, що зумовлено утворенням на їх поверхні оксидної плівки, яка стабільна у водному середовищі в діапазоні pH 5...8,5 [2, 3]. Однак катодні інтерметалічні включення у складі алюмінієвих сплавів можуть спричинити локальну корозію [4], яка прискорюється під впливом хлорид-йонів, присутніх у корозивному розчині [5]. Найпоширенішим та ефективним методом протикорозійного захисту конструкцій з алюмінієвих сплавів є лакофарбові покриття [6, 7]. Для їх одержання готують поверхню металу і наносять ґрунтувальні та завершальні шари [8]. Механізм їх захисної дії полягає у пригніченні реакцій електрохімічної корозії внаслідок блокування доступу корозивного середовища до металу та додавання до складу лакофарбового зв'язувального інгібувальних пігментів [9, 10]. Фосфат цинку належить до найпоширеніших інгібувальних пігментів. Його використовують в алкідних,

епоксидних та інших ґрунтувальних лакофарбових покриттях [11–13]. Однак через малу розчинність він має недостатні захисні властивості. Інгібувальну дію цинк-фосфатних пігментів можна посилити модифікацією або утворенням композицій з іншими сполуками-співсинергістами [14–17]. Раніше [18, 19] здійснено двостадійний механохімічний та рідкофазний синтез протикорозійного цеоліт-фосфатного пігменту на основі синтетичного цеоліту. Екстракт цього пігменту проявив високу ефективність в інгібуванні корозії алюмінієвого сплаву в хлорид-вмісному корозивному середовищі [19].

Однак протикорозійна ефективність інгібувальних пігментів та механізм їх захисної дії можуть змінюватися за додавання до лакофарбової ґрунтовки. Тому мета роботи – дослідити вплив цеоліт-фосфатного пігменту, отриманого методом двостадійного синтезу, на захисні властивості епоксидного покриття на алюмінієвому сплаві.

Матеріали та методи випроб. Для корозійних досліджень використовували алюмінієвий сплав Д16Т такого складу (mass%): $\leq 0,5$ Si; $0,3...0,9$ Mn; $\leq 0,1$ Cr; $3,8...4,9$ Cu; $1,2...1,8$ Mg; $\leq 0,25$ Zn; $\leq 0,15$ Ti та $91,4...93,70$ Al.

Синтезували комплексний протикорозійний пігмент двома стадіями [19]: спочатку синтетичний цеоліт NaA загальної формули $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ модифікували катіонами Ca^{2+} шляхом його помолу з нітратом кальцію за масового співвідношення 3:2 упродовж 1 h у високоенергетичному планетарному млині Retsch PM 100 за швидкості розмольного стакану 100 rpm. Далі на поверхню та в пори модифікованого цеоліту, промитого від нітратів дистильованою водою, рідкофазним методом осаджували фосфати кальцію та цинку послідовним прокапуванням розчинами $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ та Na_3PO_4 . Варто зауважити, що за таких умов синтезу композицій забезпечують формування малорозчинних фосфатів цинку, які поглинаються цеолітом. Порошки отриманих композицій комплексного цеоліт-фосфатного пігменту мають неправильну форму у вигляді агломератів розміром до $10...15 \mu\text{m}$ (рис. 1) та каркасну структуру синтетичного цеоліту NaA (рис. 2) з хімічним складом (mass%): $50,94$ O; $6,9$ Na; $10,91$ Al; $15,09$ Si; $0,16$ Ca; $7,17$ P та $10,32$ Zn.

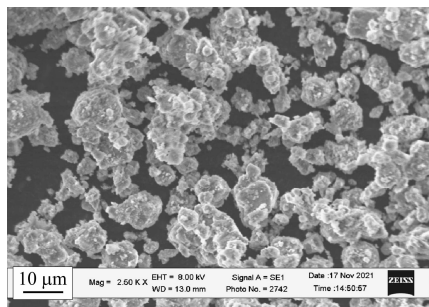


Рис. 1. Fig. 1.

Рис. 1. СЕМ зображення інгібувального пігменту [19].

Fig. 1. SEM image of the inhibiting pigment [19].

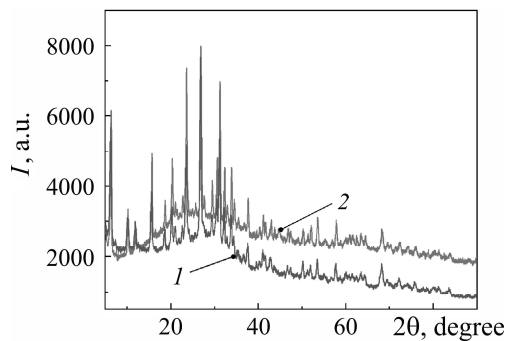


Рис. 2. Fig. 2.

Рис. 2. Рентгенограми вихідного цеоліту NaA (1) та інгібувального пігменту (2) [19].

Fig. 2. X-ray patterns of the original NaA zeolite (1) and the inhibiting pigment (2) [19].

Отриманий пігмент додавали до епоксидного покриття УП-624 (ТОВ “СП “УНІХІМ”) за концентрації 6 vol.%. Для рівномірного його розподілення в епоксидному зв’язувальному, суміш диспергували ультразвуковою обробкою на приладі УЗДН-А. В’язкість отриманої епоксидної композиції перед нанесенням контролювали на віскозиметрі ВЗ-246, згідно з ДСТУ ISO 2431:2015. Покриття наносили за допомогою прямокутного аплікатора двома шарами (з пігментом та без)

на пластини (150×75×3 mm), виготовлені з алюмінієвого сплаву Д16Т, та витримували до повного тверднення впродовж 7 days за 20°C. Поверхню зразків металу перед нанесенням покриття готували відповідно до ДСТУ ISO 12944-6:2019. Загальна товщина епоксидних покриттів ~ 110±5 μm.

Корозійно-електрохімічні властивості сплаву Д16Т з епоксидними покриттями досліджували методом електрохімічної імпедансної спектроскопії з використанням потенціостата/гальваностата VersaSTAT 3 (AMETEK Scientific Instruments), насиченого хлоридсрібного електрода-порівняння та платинового допоміжного у діапазоні частот змінного струму від 10000 до 0,01 Hz з амплітудою сигналу ±10 mV. Випробовували в 0,1% розчині хлориду натрію. Для виявлення захисної дії пігментів у покриттях зробили наскрізні дефекти Ø 1 mm. Імпедансні залежності знімали після 24 та 168 h витримки в корозивному середовищі.

Захисні властивості інгібованих епоксидних покриттів на пластинах алюмінієвого сплаву Д16Т (150×75×3 mm) вивчали в камері тепла і вологи 12КТВ-0,4-012 впродовж 720 h за безперервної конденсації вологи, відповідно до ДСТУ ISO 6270-1:2022. Температура випробувань 38±2°C, відносна вологість повітря 95%. При цьому в покриттях скальпелем зробили наскрізні дефекти завдовжки 50 mm. Вплив безперервної конденсації вологи на зміну морфології та характеристик рельєфу поверхні зразків з епоксидним покриттям досліджували на мікроскопі Zeiss Stemi-2000 та безконтактному тривимірному інтерференційному профілометрі "Micron-alpha" [20].

Результати електрохімічної імпедансної спектроскопії. Захисні властивості епоксидного покриття з 6 vol.% комплексним цеоліт-фосфатним пігментом та наскрізним дефектом оцінювали методом електрохімічної імпедансної спектроскопії. Для порівняння також знімали спектри імпедансу ненаповненого епоксидного ґрунту. Результати досліджень подані у вигляді діаграм Бode (рис. 3).

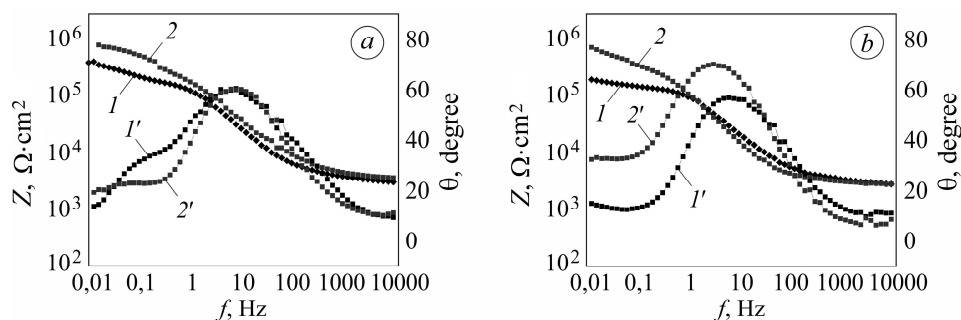


Рис. 3. Частотні залежності модуля імпедансу (1, 2) та фазового кута (1', 2') зразків алюмінієвого сплаву з пошкодженими епоксидними покриттями (1', 1) та з комплексним цеоліт-фосфатним пігментом (2', 2) після 24 (a) та 168 h (b) витримки у 0,1% розчині хлориду натрію.

Fig. 3. Frequency dependences of the impedance module (1, 2) and phase angle (1', 2') of aluminum alloy samples with damaged epoxy coatings without pigment (1', 1) and with complex zeolite phosphate pigment (2', 2) after 24 (a) and 168 h (b) exposure to a 0.1% sodium chloride solution.

Частотні залежності модуля імпедансу алюмінієвих зразків з пошкодженими епоксидними покриттями свідчать про вищі захисні властивості інгібованого покриття та про стабільніші бар'єрні характеристики впродовж випробувань. Так, після 24 h його експозиції у 0,1% хлоридному розчині (рис. 3a) значення модуля імпедансу $Z_{0,1}$ становило $7,863 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$, що у 2 рази перевищує показник для покриття без пігменту. Це вказує на гальмування корозійних процесів внаслідок формування щільного цинк-фосфатного шару у місці наскрізного дефекту.

Зі збільшенням тривкості експозиції до 168 h деградація неінгібованого епоксидного покриття зростає, на що вказує зменшення його модуля імпедансу за частоти 0,1 Hz до $1,85 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$. При цьому зменшення фазового кута за середніх частот змінного струму до 50° свідчить про зниження адгезійних та захисних властивостей покриття через проникнення електроліту в пори епоксидного шару та поширення підплівкової корозії. Підвищений фазовий кут у зразку з інгібованим покриттям можна пояснити утворенням захисної фосфатної плівки на металі в місці дефекту [21].

Імпедансні спектри алюмінієвого сплаву з пошкодженими епоксидними покриттями моделювали з використанням еквівалентного кола $R_s(Q_f(R_f(Q_{dl}R_{ct})))$, зображеного на рис. 4. Тут R_s описує опір корозійного розчину; R_f – опір електролітичного середовища в порах покриття; Q_f – ємність покриття, виражену через елемент сталої фази; R_{ct} – опір переносу заряду металу; Q_{dl} – ємність подвійного шару зарядів на металі в районі дефекту покриття, виражену через елемент сталої фази. Це еквівалентне електричне коло цілком задовільно описує імпедансні спектри та дає змогу обчислити параметри імпедансу з мінімальною похибкою.

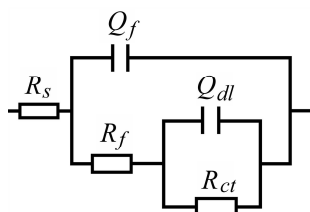


Рис. 4. Еквівалентна електрична схема, яка моделює корозію зразків алюмінієвого сплаву з дефектними покриттями.

Fig. 4. Equivalent electrical circuit simulating corrosion of aluminum alloy samples with defective coatings.

Згідно з працею [22], загальний поляризаційний опір таких покриттів можна розрахувати як суму опорів лакофарбового покриття R_f та перенесення заряду металу R_{ct} . Отже, за результатами обчислень встановлено (табл. 1), що більші значення поляризаційного опору, то вищі захисні властивості має покриття з комплексним цеоліт-фосфатним пігментом.

Таблиця 1. Характеристики еквівалентного кола, одержані моделюванням імпедансних спектрів (рис. 3)

Епоксидне покриття	R_{ct} , $\Omega \cdot \text{cm}^2$	$Q_{dl}(Y_0)$, $\text{s}^n/\Omega \cdot \text{cm}^2$	$Q_{dl}(n)$	R_f , $\Omega \cdot \text{cm}^2$	$Q_f(Y_0)$, $\text{s}^n/\Omega \cdot \text{cm}^2$	$Q_f(n)$
24 h витримки						
без пігменту	$4,102 \cdot 10^5$	$7,078 \cdot 10^{-7}$	0,88	4270	$2,369 \cdot 10^{-6}$	0,37
+ 6 vol.% пігменту	$9,835 \cdot 10^5$	$8,344 \cdot 10^{-7}$	0,79	4397	$1,179 \cdot 10^{-6}$	0,39
168 h витримки						
без пігменту	$1,883 \cdot 10^5$	$1,281 \cdot 10^{-6}$	0,85	3304	$1,611 \cdot 10^{-6}$	0,40
+ 6 vol.% пігменту	$9,016 \cdot 10^5$	$1,460 \cdot 10^{-6}$	0,94	3627	$2,403 \cdot 10^{-6}$	0,94

Таким чином, використання комплексного цеоліт-фосфатного пігменту, отриманого двостадійним методом, забезпечує підвищення захисних властивостей епоксидного покриття, що пов'язано зі зменшенням електрохімічної активності металу в місці наскрізного дефекту внаслідок формуванням щільної фосфатної плівки.

Дослідження методом оптичної 3D профілометрії. Вивчали поверхню зразків з епоксидними покриттями після експозиції за температури $38 \pm 2^\circ\text{C}$ та відносної вологості 95% за допомогою інтерференційного профілометра “Micron-alpha” методом обробки послідовності інтерференційних зображень у білому світлі. Отримано оптичні 3D профілі поверхонь на ділянках епоксидного покриття розміром $340 \times 250 \mu\text{m}$ (рис. 5a, c, e) і наскрізного дефекту в ньому $340 \times 110 \mu\text{m}$ (рис. 5b, d, f) та розраховано середні арифметичні відхилення профілю R_a та висоту нерівностей по десяти точках R_z (табл. 2).

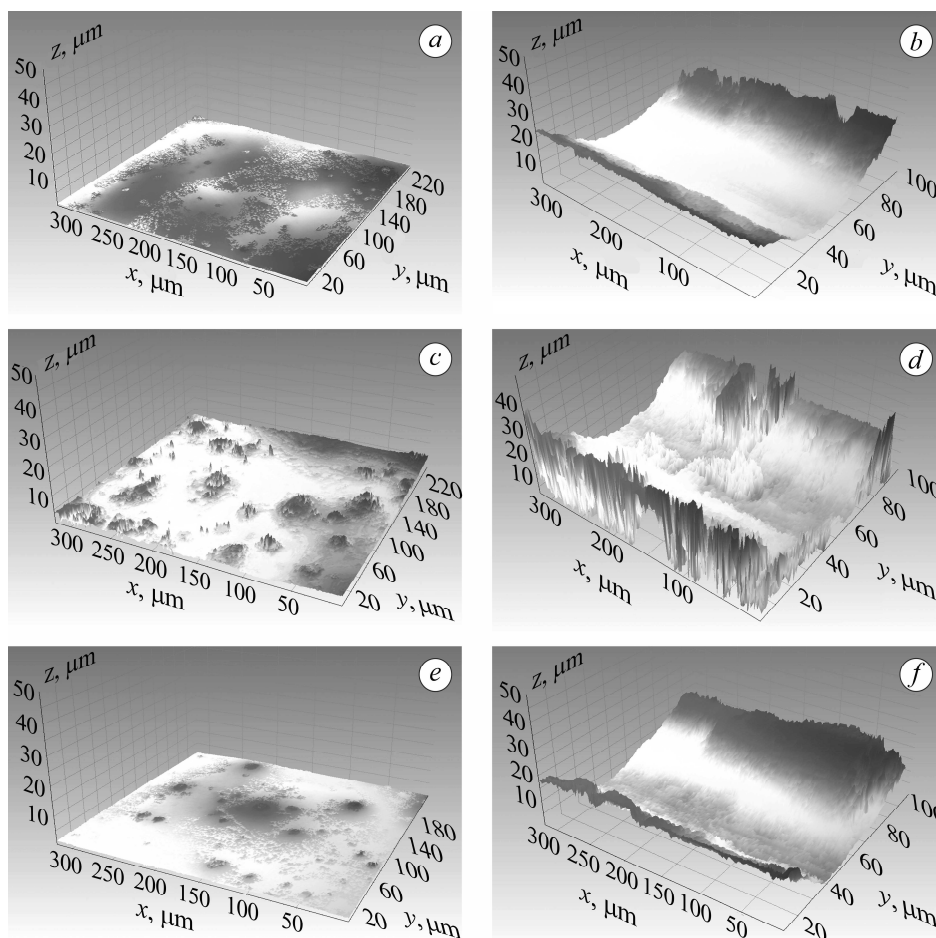


Рис. 5. Морфологія поверхні (а, с, е) та дефекту (b, d, f) епоксидних покриттів на сплаві Д16Т у вихідному стані (а, b) та після витримки 720 h у камері тепла та вологі: с, d – покриття без пігменту; е, f – із пігментом.

Fig. 5. Morphology of the surface (a, c, e) and defect (b, d, f) of epoxy coatings on Д16Т alloy in the initial state (a, b) and after 720 h exposure in a chamber of heat and humidity: c, d – coating without pigment; e, f – with pigment.

Для епоксидного покриття без впливу безперервної конденсації вологи параметри профілів суцільної поверхні та його наскрізного дефекту R_a та R_z – 0,22 і 0,95 та 0,96 і 3,88 відповідно (табл. 2), а їхні 3D профілі рівномірні (рис. 5a, b). Дослідженнями поверхні зразків без пігменту після витримки впродовж 720 h у камері тепла і вологі встановлено, що параметри шорсткості профілів R_a та R_z зростають в $\sim 2,1$ і $\sim 2,4$ раза для поверхні епоксидного покриття, а для його наскрізного дефекту в $\sim 2,7$ і $\sim 2,4$ раза порівняно зі зразками, які не піддавались корозії (табл. 2). Виявлено, що поверхня епоксидного покриття несутільна, нерівномірна та вкрита точковими дефектами розміром $\sim 20 \pm 5 \mu\text{m}$ внаслідок накопичення вологі та руйнування поверхневого шару, а в наскрізному дефекті є продукти корозії алюмінієвого сплаву (рис. 5c, d). За додавання комплексного цеоліт-фосфатного пігменту до епоксидного ґрунтувального шару, середньо арифметичне відхилення профілю R_a та висота нерівностей R_z поверхні зразків після експозиції у випробувальній камері впродовж 720 h становлять $\sim 0,24$ і $\sim 1,27$ та $\sim 1,05$ і $\sim 3,95$ для поверхонь покриття та дефекту, відповідно. Отримані параметри профілів R_a та R_z незначно відрізняються від неекспонованих зразків та є нижчими

від таких же характеристик поверхонь покриття та дефекту неінгібованого епоксидного покриття після 720 h витримки в камері тепла та вологи (табл. 2). На побудованих 3D профілях зразків (рис. 5e, f) спостерігаємо незначну кількість дефектів на поверхні покриття з комплексним пігментом, проте вона є суцільною та без пошкоджень верхнього шару, а ділянка наскрізного дефекту є гладкою, без слідів корозії.

Таблиця 2. Параметри шорсткості поверхні епоксидного покриття з наскрізним дефектом після витримки 720 h у камері тепла та вологи

Ділянка	Тривалість експозиції, h					
	0		720			
			Без пігменту		З пігментом	
	R_a	R_z	R_a	R_z	R_a	R_z
Поверхня	0,22	0,95	0,46	2,28	0,24	1,27
Дефект	0,96	3,88	2,55	9,37	1,05	3,95

Механізм захисної дії пігменту. Згідно з працею [23], збільшення дисперсності фосфатного пігменту поліпшує його захисні властивості. Тут нанодиспергування може відбуватися під час рідкофазної інтеркаляції цинк-фосфатної фази в пори синтетичного цеоліту. Поліпшену захисну дію комплексного цеоліт-фосфатного пігменту в епоксидному покритті на алюмінієвому сплаві можна пояснити поступовим розчиненням наноструктурованої інгібіторної фази з вивільненням катіонів кальцію та цинку і фосфат-йонів з подальшим осадженням гідроксиду цинку та фосфатів цинку і кальцію переважно на катодних ділянках, а фосфату алюмінію – на анодних [10, 24].

ВИСНОВКИ

Механохімічною модифікацією синтетичного цеоліту катіонами кальцію з подальшою рідкофазною обробкою нітратом цинку і фосфатом натрію одержали новий цеоліт-фосфатний протикорозійний пігмент. Встановлено, що він суттєво підвищує захисні властивості епоксидного покриття на алюмінієвому сплаві через утворення корозійнотривкої фосфатної плівки в місцях наскрізних дефектів лакофарбового шару. При цьому опір переносу заряду металу з епоксидним покриттям зріс у 2,4 та 4,8 раза відповідно після 24 та 168 h витримки в корозивному середовищі порівняно з неінгібованим покриттям, що свідчить про суттєве зменшення підплівкової корозії металу. Оптичною 3D профілометрією виявлено, що параметри шорсткості профілю поверхні покриття та дефекту R_a та R_z в епоксидному покритті з пігментом після витримки у камері тепла та вологи зберігалися на вихідному рівні внаслідок гальмування корозійних процесів на алюмінієвому сплаві та відсутності продуктів корозії.

Робота виконана в межах проекту № 2020.02/0063 “Синтез та властивості нових комплексних протикорозійних пігментів для лакофарбових покриттів на основі алюмосилікатних наноконтейнерів” Національного фонду досліджень України.

1. Starke E. A. Aluminum Alloys // Encyclopedia of Materials: Sci. and Technol. – Elsevier, 2001. – P. 114–116. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043152-6/00024-3>
2. Rams J. Wrought Aluminum Alloys // Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys. – Elsevier, 2022. – P.132–140. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00083-1>
3. Fuente D. Corrosion of Aluminum, Aluminum Alloys, and Composites // Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys. – Elsevier, 2022. – 1. – P. 160–169. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00047-8>
4. Yasakau K. A., Zheludkevich M. L., and Ferreira M. G. S. Corrosion and Corrosion Protection of Aluminum Alloys // Encyclopedia of Interfacial Chemistry. – Elsevier, 2018. – P. 115–127. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-346-2.00015-7>

5. Natishan P. M. and O'grady W. E. Chloride ion interactions with oxide-covered aluminum leading to pitting corrosion: a review // J. of The Electrochem. Soc. – 2014. – **161**. – № 9. – P. 421. DOI 10.1149/2.1011409jes
6. Lyon S. B., Bingham R., and Mills D. J. Advances in corrosion protection by organic coatings: what we know and what we would like to know // Progress in Organic Coat. – 2017. – **102**. – P. 2–7. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2016.04.030>
7. Funke W. Problems and progress in organic coatings science and technology // Progress in Organic Coat. – 1997. – **31**, № 1–2. – P. 5–9. [https://doi.org/10.1016/S0300-9440\(97\)00013-1](https://doi.org/10.1016/S0300-9440(97)00013-1)
8. Frank N. Jones, Mark E. Nichols, Socrates Peter Pappas. Organic Coatings: Science and Technology. – Wiley, 2017. – 512 p.
9. Kendig M. Evaluation of corrosion inhibiting pigments // ECS Transact. – 2010. – **24**, № 1. – P. 39–49. DOI: 10.1149/1.3453605
10. Etrudt G. Pigments, Inorganic, 5. Anticorrosive Pigments. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. – Weinheim: Wiley, 2012. – **27**. – P. 343–357.
11. The role of a zinc phosphate pigment in the corrosion of scratched epoxy coated steel / Y. Shao, C. Jia, G. Meng, T. Zhang, and F. Wang // Corr. Sci. – 2009. – **51**, № 2. – P. 371–379. DOI: 10.1016/j.corsci.2008.11.015
12. Alibakhshi E., Ghasemi E., and Mahdavian M. Sodium zinc phosphate as a corrosion inhibitive pigment // Progress in Organic Coatings. – 2014. – **77**, № 7. – P. 1155–1162. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2014.03.027>
13. The contribution of Zn(II) and phosphate anions to the inhibition of organic coating cathodic disbondment on galvanised steel by zinc phosphate pigment / C. M. Griffiths, N. Wint, G. Williams, and H. N. McMurray // Corr. Sci. – 2022. – **198**. – Article number: 110111. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110111>
14. Ultrasonically created rectangular shaped zinc phosphate nanopigment / S. E. Karekar, A. J. Jadhav, C. R. Holkar, N. L. Jadhav, D. V. Pinjari, A. B. Pandit, B. A. Bhanvase, and S. H. Sonawane // Process Modeling, Simulation, and Environmental Applications in Chemical Eng. – 2016. – P. 181–197. <https://doi.org/10.1201/9781315366449>
15. Aluminium alloy corrosion inhibition by chromate-free composition of zinc phosphate and ion-exchanged zeolite / V. I. Pokhmurskii, I. M. Zin, L. M. Bilyi, V. A. Vynar, and Y. I. Zin // Surf. and Interface Analysis. – 2013. – **45**, № 10. – P. 1474–1478. DOI:10.1002/sia.5275
16. Synergistic effect of phosphate and calcium-containing pigments on the corrosion resistance of galvanized steel / V. I. Pokhmurs'kyi, I. M. Zin', S. B. Layon, and L. M. Bilyi // Materials Science. – 2003. – **39**, № 2. – P. 153–160. DOI:10.1023/B:MASC.0000010264.27310.9e
17. Protective properties of mechanochemically fabricated zeolite/phosphate anticorrosion pigments for paint coatings / S. A. Korniy, I. M. Zin, M.-O. M. Danyliak, O. P. Khlopyk, V. S. Protsenko, L. M. Bilyi, M. Ya. Holovchuk, and Ya. I. Zin // Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii. – 2021. – № 3. – P. 107–112. DOI:10.32434/0321-4095-2021-136-3-107-112
18. Corrosion inhibition of low-alloy steel by a composite pigment based on zeolite and monocalcium phosphate / S. A. Korniy, I. M. Zin, M.-O. M. Danyliak, O. P. Khlopyk, and B. M. Datsko // Materials Science. – 2022. – **58**, № 2. – P. 261–267. DOI:10.1007/s11003-022-00658-y
19. Aluminium alloy corrosion inhibition by a two-stage modified nanoporous zeolite / S. A. Korniy, I. M. Zin, O. P. Khlopyk, M. Ya. Holovchuk, M. -O. M. Danyliak, B. M. Datsko, and P. Ya. Lyutyty // Corr. Eng., Sci. and Techn. – 2022. – **57**, № 8. – P.740–748. DOI: 10.1080/1478422X.2022.2125647
20. Zakiev V. I. Non-contact method of surface 3D profiling // Вісник національного авіаційного університету. – 2005. – № 4. – P. 109–111. DOI: 10.18372/2306-1472.26.1245
21. Fast evaluation of degradation degree of organic coatings by analyzing electrochemical impedance spectroscopy data / D. Xia, S. Song, J. Wang, H. Bi, and Z. Han // Transactions of Tianjin University. – 2012. – **18**. – P. 15–20.
22. Influence of the thickness and roughness of polyaniline coatings on corrosion protection of AA7075 aluminum alloy / R. M. Bandeira, J. Drunen, A. C. Garcia, and G. Tremiliosi-Filho // Electrochimica Acta. – 2007. – **240**. – P. 215–224. DOI: 10.1016/j.electacta.2017.04.083
23. Anticorrosive 2K polyurethane paints based on nano- and microphosphates with high dispersing additive content / K. Kowalczyk, K. Łuczka, B. Grzmil, and T. Szychaj // Progress in Organic Coat. – 2013. – **76**, № 7–8. – P. 1088–1094. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2013.03.003
24. The mechanism of inhibition by zinc phosphate in an epoxy coating / Y. Hao, F. Liu, E.-H. Han, S. Anjum, and G. Xu // Corr. Sci. – 2013. – **69**. – P. 77–86. DOI: 10.1016/j.corsci.2012.11.025

Одержано 10.10.2023